



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

LETECKÝ ÚSTAV

INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

ZHODNOCENÍ VÝHOD A NEVÝHOD SYSTÉMŮ AUTOMATIZACE V LETOUNU

EVALUATION OF ADVANTAGES AND DISADVANTAGES OF AIRCRAFT AUTOMATIC
SYSTEMS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Michal Vrána

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Michaela Horpatzká

BRNO 2021

Zadání bakalářské práce

Ústav: Letecký ústav
Student: **Michal Vrána**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojírenského inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Michaela Horpatzká**
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Zhodnocení výhod a nevýhod systémů automatizace v letounu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Současným trendem ve vývoji palubních přístrojů letadel je snaha o převzetí úkonů, které dříve vykonávali členové posádky, automatickými systémy. Tyto systémy mají za úkol odlehčit pracovní zatížení posádky zejména při dlouhodobých rutinních úkonech. Ty se liší podle zaměření a kategorie letounu. Automatizace se sebou však nese také problémy. Ty mohou mít např. podobu přílišné důvěry pilotů v tyto systémy, pokles jejich schopnosti nahradit tyto systémy v případě jejich poruchy atd.

Cíle bakalářské práce:

Vytvořit přehled používaných druhů automatizace v avionickém vybavení letadel
Shrnout výhody i nevýhody užívání těchto systémů pro bezpečné provedení letu
Shrnout nehody způsobené např. nevhodným použitím a prací s automatickými systémy

Seznam doporučené literatury:

MOIR, I., SEABRIDGE A.G.: Aircraft systems: mechanical, electrical, and avionics subsystems integration. 3rd ed. Hoboken, NJ: Wiley, c2008. Aerospace series (Chichester (England)). ISBN 978-470-05996-8.

In-flight simulators and fly-by-wire/light demonstrators: a historical account of international aeronautical research, 2017. New York, NY: Springer Berlin Heidelberg. ISBN 978-3-319-53996-6.

MARTINUSSEN, M., HUNTER D.R.: Aviation psychology and human factors. Second edition. Boca Raton. ISBN 978-1-4987-5752-2. 2018.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jaroslav Juračka, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato práce pojednává o systémech automatizace v civilních letounech. V první části je rozebrán historický vývoj soustavy řízení a systémů automatizace spolu s filozofií, s jakou je v dnešní době do letounů implementována. Následuje zhodnocení výhod a nevýhod systému spolu s výčtem a následným popisem jednotlivých systémů, které se podílejí na automatickém letu. V poslední části práce jsou rozebrány vybrané letecké nehody a incidenty se zaměřením na vliv automatizace a případného lidského faktoru.

KLÍČOVÁ SLOVA

Avionika, autopilot, automatizace, automatické systémy, fly-by-wire, nehoda, incident, MCAS

ABSTRACT

This bachelor's thesis deals with civil airplane automatic systems. The first part analyses historical development of flight control systems and automatic system together with philosophy, which is implemented in modern airliners. In the next part, we evaluate advantages and disadvantages together with list and description of modern avionic systems, which participate on automatic flight. In the last part, selected airplane incidents and accidents are analysed, focusing on influence of automation with incidental human factor.

KEY WORDS

Avionics, autopilot, automation, automatic systems, fly-by-wire, accident, incident, MCAS

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

VRÁNA, Michal. *Zhodnocení výhod a nevýhod systémů automatizace v letounu*. Brno, 2021. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132717>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Letecký ústav. Vedoucí práce Michaela Horpatzká.

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval mé vedoucí bakalářské práce Ing. Michaele Horpatzké za ochotu, cenné rady, vstřícný přístup a pomoc při psaní této závěrečné práce. Velké díky patří také mé rodině a dalším známým za podporu během celého mého studia.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Čestně prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem a zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Michaely Horpatzké s využitím informačních zdrojů uvedených v seznamu.

V Bučovicích dne 20. května 2021

.....
Michal Vrána



Obsah

Seznam použitých zkratk.....	15
Úvod	16
1 Soustavy řízení letounu	17
1.1 Mechanické	17
1.2 Mechano-hydraulické	17
1.3 Elektro-hydraulické	18
1.3.1 Fly-by-wire	18
1.3.2 Power-by-wire	20
2 Automatizace řízení letounu	21
2.1 Historický vývoj automatizace letounu	21
2.2 Filozofie automatizace v letounu	23
2.3 Přínosy automatizace v řízení letounu.....	24
2.4 Problémy, spojené s automatizací řízení letounu	26
3 Systémy automatizace řízení letounu.....	28
3.1 Autopilot	28
3.2 Flight Director	29
3.3 Autothrottle	30
3.4 Flight Management System.....	31
3.5 Systém ochrany letové obálky	31
3.5.1 Obratová obálka.....	32
3.5.2 Poryvová obálka	33
3.5.3 Letová obálka.....	33
4 Vybrané nové záchranné systémy v GA letounech	35
4.1 Garmin Emergency descent	35
4.2 Garmin Autoland.....	35
4.3 Return-to-level button	36
5 Vybrané letecké nehody s podílem automatizace	37
5.1 Ethiopian Airlines 302.....	37
5.1.1 Popis nehody	37
5.1.2 Vliv automatizace	38



5.2	Turkish Airlines 1951	39
5.2.1	Popis nehody	39
5.2.2	Vliv automatizace	40
5.3	Asiana Airlines 214	42
5.3.1	Popis nehody	42
5.3.2	Vliv automatizace	43
5.4	Air France 447	43
5.4.1	Popis nehody	43
5.4.2	Vliv automatizace	44
5.5	Air Transat 236	45
5.5.1	Popis incidentu	45
5.5.2	Vliv automatizace	45
Závěr		47
Použitá literatura		48
Seznam obrázků		53



Seznam použitých zkratk

A/T	autothrottle
BLEU	Blind landing experimental unit
CPT	captain
DME	distance measuring equipment
ECAM	electronic centralized aircraft monitor
ESP	electronic stability protection
F/O	first officer
FAA	Federal aviation administration
FADEC	full authority digital engine control
FBW	fly-by-wire
FCU	flight control unit
FD	flight director
FMS	flight management system
GA	general aviation
GPS	global positioning system
INS	inertial navigation system
LVL	level
MCAS	maneuvering characteristics augmentation system
MCDU	multi-function control and display unit
MCP	mode control panel
MLS	microwave landing system
PFD	primary flight display
VOR	very high frequency omni-directional range
RWY	runway
YD	yaw damper



Úvod

Tato bakalářská práce se zabývá zhodnocením výhod a nevýhod systémů automatizace v civilních dopravních letounech a v letounech všeobecného letectví. Stejně jako ve všech technických odvětvích, je i v letectví snaha automatizovat veškeré procesy ve snaze celkového zvýšení bezpečnosti provozu. Při navrhování automatizace je však nutné brát ohled především na míru automatizace, její komunikaci s lidskou posádkou a kdy dojde k její aktivaci, případně deaktivaci.

I přes skutečnost, že první letoun vzletl teprve před cca 120 lety, došlo během jeho vývoje napříč časem k velkým změnám v oblasti řízení vlivem narůstajících rozměrů, hmotností a rychlostí. Toto je tématem první kapitoly.

Druhá kapitola se zabývá historickým vývojem automatizace - od prvních gyroskopických stabilizačních systémů, které umožňovaly držení nastaveného režimu letu, až po dnešní moderní systémy, umožňující automaticky ovládat letoun prakticky po celý let. Dále rozebírá jednotlivé výhody a nevýhody využití automatických systémů a jejich vliv na lidský faktor při řízení letounu.

Třetí kapitola se věnuje představení jednotlivých základních systémů spolu s vysvětlením pojmů letové, obrátové a poryvové obálky.

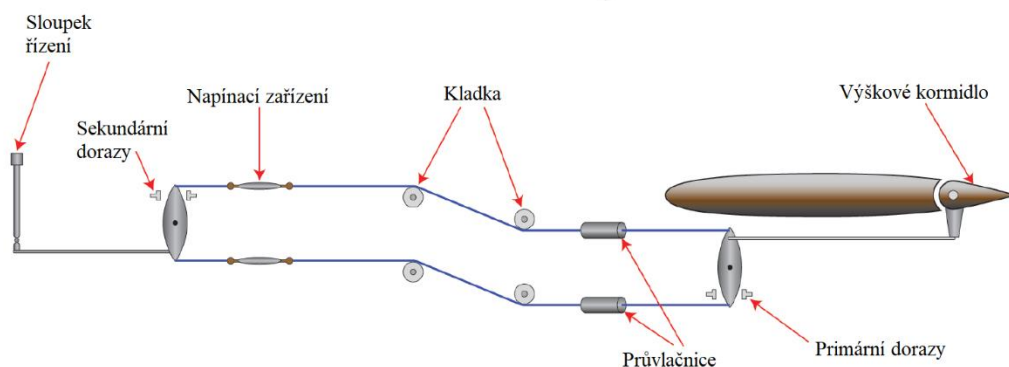
Čtvrtá kapitola se věnuje vybraným novým záchranným systémům, které se začínají objevovat ve všeobecném letectví a mají za cíl výrazně zvýšit bezpečnost letového provozu v této oblasti.

Poslední pátá kapitola se zabývá vybranými nehodami a prozkoumává především podíl automatizace a lidského faktoru na nehodě. Jsou zde vybrány především nehody, u kterých závada na automatickém systému byla přímou příčinou nehody.

1 Soustavy řízení letounu

1.1 Mechanické

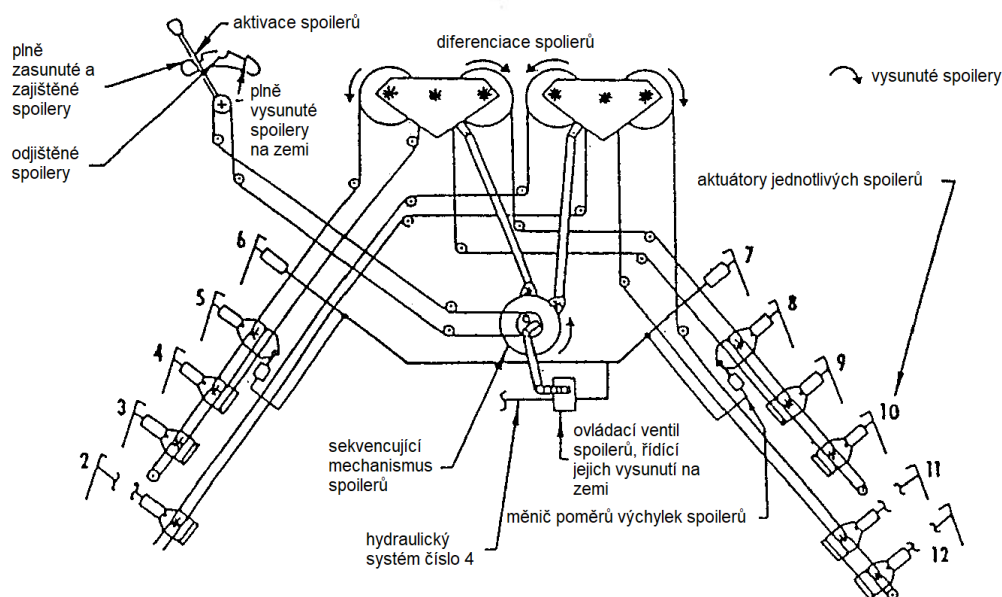
V mechanické soustavě jsou řídicí plochy připojeny přímo ke sloupku řízení a pedálům pomocí systémů táhel, lan, pák a řetězů. Jedná se o nejstarší typ soustavy řízení letounu. S rostoucí velikostí letounu a rychlostí jeho letu rostou i síly, potřebné k jeho řízení. Tím nejen roste hmotnost celé soustavy, ale řízení se také pro pilota stává fyzicky náročné. V dnešní době jsou tímto způsobem řízeny především malé letouny všeobecného letectví (*general aviation*, zkr. GA), u kterých jsou síly v řízení přijatelné a lze je dostatečně ovlivnit například vyvažovacími nebo odlehčovacími ploškami. Mezi další nevýhody mechanických táhel patří jejich délková nestabilita způsobená teplotní dilatací, náročná údržba systému, složitá možnost opravy v případě poruchy a celková náročnost z hlediska návrhu kinematiky systému [1].



Obrázek 1.1 - Mechanické ovládání výškového kormidla [2]

1.2 Mechano-hydraulické

V mechano-hydraulické soustavě jsou mechanicky spojeny hydraulické aktuátory jednotlivých řídicích ploch a sloupek řízení s pedály. Výhodou tohoto systému je možnost přenesení velkých sil na řízené plochy. Jeho nevýhodou je vyšší hmotnost soustavy, zvýšené nároky na údržbu hydraulické části a chybějící zpětná vazba v případě nevratného uspořádání. Toto je řešeno přidáním systému umělého citu, které dodatečně zavádějí sílu do soustavy řízení – ať už se jedná o pružiny nebo o speciální hydraulické prvky [1].



Obrázek 1.2 - Mechanismus spoilerů, ovládající příčné řízení letounu Boeing 737 [1]

1.3 Elektro-hydraulické

1.3.1 Fly-by-wire

Výhodou systémů fly-by-wire (zkr. *FBW*) je eliminace soustavy táhel a lan řízení. Místo toho jsou jednotlivé signály přenášeny jako analogový nebo digitální elektrický signál ze sloupku řízení do letových počítačů, které vysílají povely do jednotlivých hydraulických aktuátorů [1]. Mezi výhody patří úspora hmotnosti, jednodušší instalace a návrhové požadavky, úspora objemu, zvýšení spolehlivosti, snížení času a požadavků na údržbu nebo možnost modulární výměny komponent. Dále zvýšení manévrovatelnosti, možnost nastavení ochrany letové obálky, větší tolerance teplotní dilatace a ohybu křídla [2]. Výhodou především u dopravních letounů je pak možnost sjednocení chování napříč typy, díky čemuž není nutný pro piloty obsáhlý rozdílový výcvik a je možné sdílet typový certifikát [3]. U letounů Airbus dochází při výchylce páky během standardního režimu k nastavení úhlové rychlosti rotace kolem dané osy, což umožňuje již výše zmíněné sjednocení ovládacích charakteristik napříč typy [4].



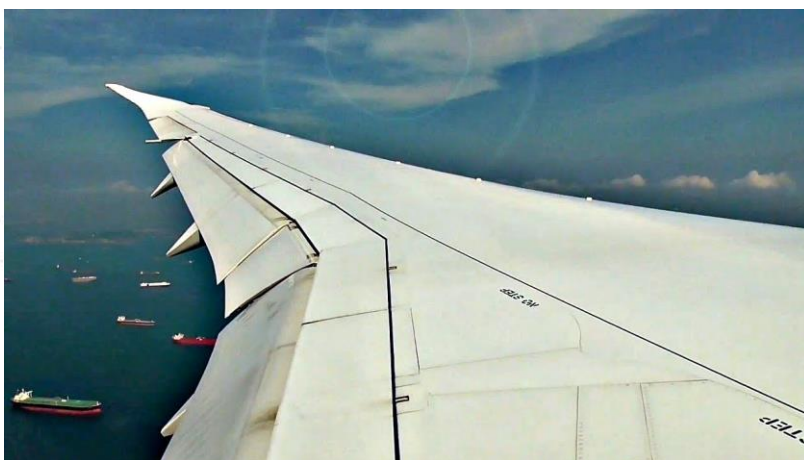
Obrázek 1.3 - Airbus A350-900, vybavený systémem fly-by-wire [5]



Airbus i Boeing jakožto dva největší výrobci dopravních letounů využívají u moderních strojů systémy FBW, ovšem s lehce jinou filozofií fungování. FBW u Boeingu zajišťuje i ochranu před pádem, ale větší síla, vyvinutá na sloupek řízení umožní posádce použít i větší výchylku kormidla, než je bezpečné nebo vede mimo letovou obálku. U Airbusu ve standardním režimu fungování se nemůže pilot jakoukoliv výchylkou side sticku dostat mimo letovou obálku [6]. Použití fly-by-wire bez mechanické zálohy umožňuje i „rozpojení“ jednotlivých řídicích ploch. Díky tomu je možné například během přiblížení na přistání vychýlit křídélka směrem dolů a využít je jako flaperony, případně po dosednutí na zem jako rušiče vzlaku. Výhodou je i možnost rekonfigurace systému řízení v případě poruchy. Dojde-li například k zablokování křídélka, může letový počítač pro zachování říditelnosti upravit výchylky jednotlivých spoilerů. Řízení však pro pilota zůstává stejné.



Obrázek 1.4 - Vysunutá mechanizace křídla po přistání – flaperon i křídélka vychýlena směrem nahoru, kde slouží podobně jako spoilers k rušení vzlaku a zvýšení odporu [6]



Obrázek 1.5 - Stejný typ letounu před přistáním – flaperon sklopen dolů a křídélka v horizontu [7]



1.3.2 Power-by-wire

Systém power-by-wire je další evolucí v soustavách řízení letounů. Systém fly-by-wire oproti konvenčním systémům eliminuje hmotné soustavy táhel a kladek. Systém power-by-wire využívá stejného principu přenosu signálu ze sloupku řízení a pedálů na aktuátory, ty jsou ovšem poháněny elektricky. Díky tomuto došlo k úspoře hmotnosti v podobě eliminace letadlových hydraulických okruhů. V současné době toto řešení využívá Lockheed Martin F-35 Lightning II [7].



Obrázek 1.6 - Lockheed Martin F-35A Lightning II vybavený systémem power-by-wire [8]



2 Automatizace řízení letounu

2.1 Historický vývoj automatizace letounu

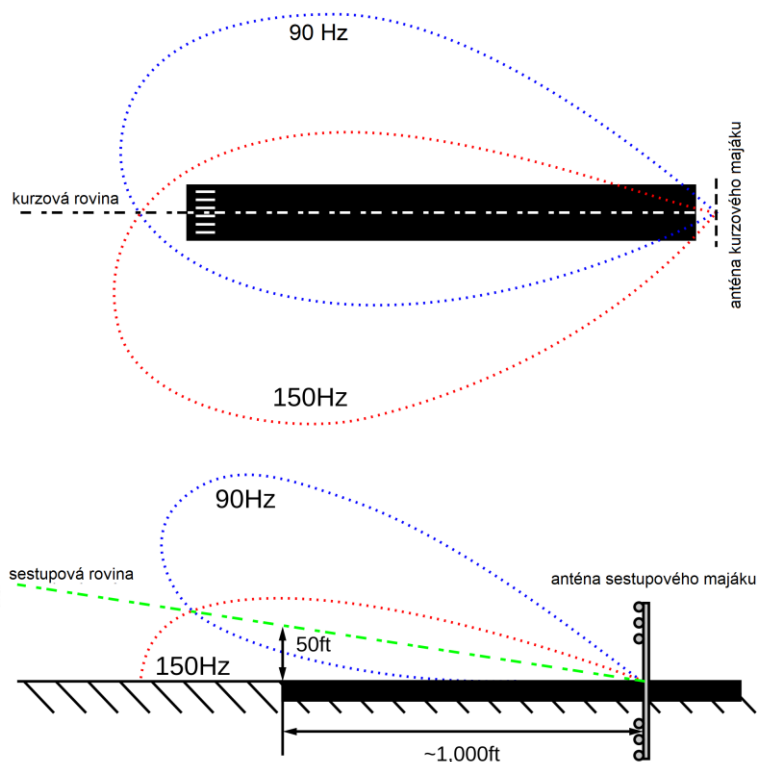
První gyroskopické stabilizační systémy se začaly objevovat již kolem roku 1913. Tehdy bylo snahou vyvinout systém, který udrží letoun ve stabilním letu a uleví tak pilotovi [8]. S rostoucím objemem dopravy a narůstajícími dobami letu došlo k zavedení používání autopilota i v civilní dopravě pro snížení pracovní zátěže posádky. Během druhé světové války byl využíván pro přesné navedení a řízení letounu během bombardování. Systém podobný ILS (*instrument landing system*) byl také využíván pro navádění vojenských letounů na přistání během zhoršených povětrnostních podmínek [9]. S rozvojem radionavigace po druhé světové válce a spojení s letovým povelovým přístrojem (*flight director*, zkr. *FD*), automatickým ovládáním tahu (*autothrottle*, zkr. *A/T*) a tlumičem bočních kmitů (*yaw damper*, zkr. *YD*) došlo ke vzniku kompletního systému, umožňující ovládání letounu ve všech třech osách a tím pádem plně řízené ovládání řídicích ploch bez zásahu posádky [1]. Významným milníkem je pak první automatizované přistání, uskutečněné v roce 1950 ve Velké Británii výzkumnou skupinou Blind Landing Experimental Unit (*BLEU*).



Obrázek 2.1 - Letoun Hawker Siddeley HS-121 Trident 3B britské společnosti British Airways (nástupce BEA). Jednálo se o první civilní letoun, certifikovaný pro plně automatické přistání [10]

Zajímavým faktem je, že tento systém fungoval pouze v Británii, neboť nepracoval na principu mezinárodně rozšířeného ILS, ale na principu microwave landing system (zkr. *MLS*). Tento systém měl za cíl nahradit, případně doplnit systém ILS a měl i několik výhod, jako například větší počet kanálů, menší vliv povětrnostních podmínek, možnost zakřivené osy sestupu nebo možnost zachycení paprsku pod širším úhlem od osy dráhy. Masové rozšíření se ovšem nikdy neuskutečnilo [11]. Významným

negativem MLS systému byla nutnost vybavit letoun jinými přijímači, které ovšem fungovaly na stejném principu jako systém ILS a umožňovaly v podstatě to samé. ILS navíc skýtal výhodu v použití stejných frekvencí jako všesměrové majáky (VOR) a systémy DME, sloužící k měření přímé vzdálenosti letoun-maják. Další nevýhodou byl rapidní nástup satelitních technologií. Aerolinie se rozhodly raději vybavit letouny přijímači GPS, které měly pro rozvoj automatického létání a navigace zásadnější vliv a poskytovaly podstatně větší možnosti [4].



Obrázek 2.2 - Schéma fungování systému ILS [13]

V 80. letech došlo ke spojení automatických systémů s inerciálními navigačními systémy (*inertial navigation system*, zkr. *INS*). Ty po nastavení aktuální polohy a následných navigačních výpočtech umožnily okamžité určení polohy nejprve ve formě souřadnic, po nástupu displejů i v podobě bodu na mapě. INS byly sice náchylné na chybu způsobenou rotací Země, bylo je ovšem možné kalibrovat pomocí pozemních navigačních prostředků jako jsou VOR/DME majáky. Tyto systémy začaly umožňovat navigaci po předem naprogramované trati bez nutnosti pozemních prostředků. V dnešní době dochází ke korekci polohy automaticky pomocí letových počítačů. Dále je tento systém rozšířen o vstup ze satelitních systémů GPS, které vypočítanou polohu letounu ještě více zpřesňují. V současné době umožňují automatické systémy navigovat letoun přes jakékoliv území a jeho



vedení bez zásahu lidské posádky během celého letu kromě vlastního vzletu [12].

2.2 Filozofie automatizace v letounu

Než budou posouzeny vlastní výhody a nevýhody, je nutné zmínit, s jakou filozofií jsou moderní automatické systémy v letounech používány a vůbec navrhovány. Základním principem je, že pilot musí být vždy o všech významných změnách informován a musí být schopen kdykoliv řízení převzít, tj. automatizace nesmí vetovat zásahy pilota, pilot ovšem může kdykoliv vetovat zásahy automatizace. Jedinou výjimkou jsou ochranné systémy, které slouží jako jakási poslední záchrana. Mezi ně patří například systémy ochrany letové obálky nebo automatické zasunutí vztlačových klapek, hrozilo-li by jejich přílišné namáhání způsobené překročením jejich maximální povolené rychlosti. Automatizace má tedy za cíl pilotovi ulevit v jednoduchých a repetitivních úkonech jako bývá rekonfigurace sekundárních systémů dle jednotlivých fází letu nebo jejich automatická regulace, případně mu asistovat při provedení letu. Dále má za důsledek zvýšení bezpečnosti letu díky schopnosti filtrovat jednotlivé informace během kritických fází letu a schopnosti seřadit je podle závažnosti [12].



Obrázek 2.3 - Hláška LDG INHIBIT upozorňuje posádku na aktivace filtrace chybových hlášek během přistání. Systém chybovou hlášku zobrazí až po přistání letounu, kdy je pracovní zátěž posádky výrazně nižší [13]



2.3 Přínosy automatizace v řízení letounu

Primárním přínosem automatizace je převzetí repetitivních úkonů a tím pádem snížení množství interakcí posádky s letounem. To nejenže šetří čas, ale vede také ke snížení pravděpodobnosti opomenutí některého úkonu a celkovému snížení pracovní zátěže posádky. Zatímco ve starších letounech bylo spouštění motoru a konfigurace ostatních systémů letounu, jako je například napojení generátorů elektřiny na palubní síť nebo napojení vzduchotechniky otázkou několika nutných manuálních úkonů, v dnešním moderním letounu se tak děje automaticky bez zásahu posádky [12].

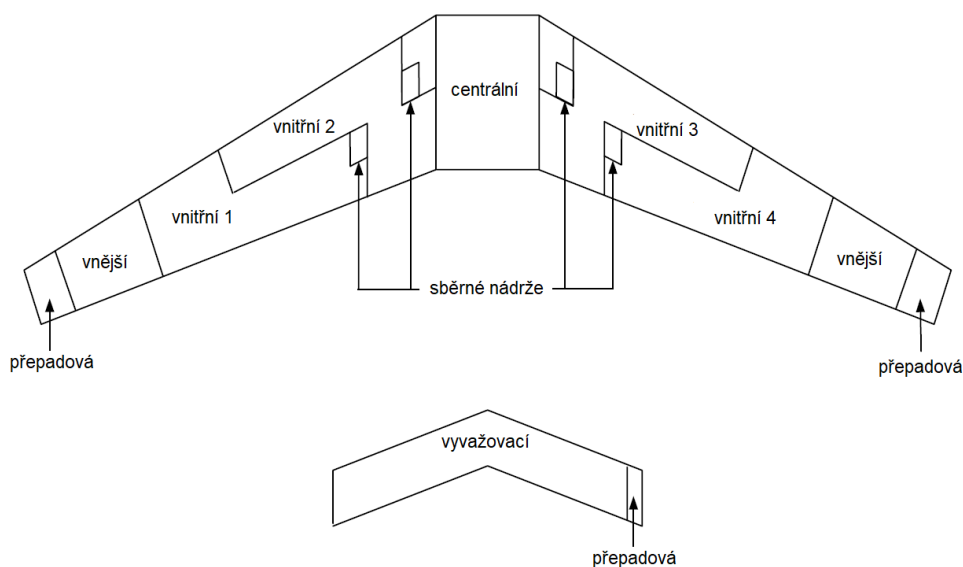


Obrázek 2.4 - Stanoviště letového inženýra Boeing 747-200. V moderních letounech je tato pozice eliminována a nahrazena automatickými systémy [14]



Obrázek 2.5 - Moderní kokpit letounu Airbus A350-900XWB [15]

Během cestovního režimu pak systémy automatickým vedením letounu po naprogramované trati výrazně snižují pracovní zátěž posádky. Automatické navigační výpočty jako je například korekce snosu větru, výpočty příletů na jednotlivé body a neustálé přepočítávání množství paliva a porovnávání s plánem pak odebírá tyto povinnosti posádce a tím vede k významnému snížení pracovní zátěže. Velkou výhodou je pak přesná pilotáž letounu v jednotlivých fázích letu, které se člověk ve většině případů nemůže vyrovnat. Přesnější jsou dále v řízení jednotlivých sekundárních systémů letounu spolu s možností jejich neustálé optimalizace [12]. U většiny velkých moderních letounů s několika palivovými nádržemi například dochází k automatickému přečerpávání paliva mezi nádržemi dle jednotlivé fáze letu. Během stoupání do cestovní hladiny je tak přečerpáno palivo do nádrží, nacházející se v zadní části letounu, případně ve svislé ocasní ploše. To má za následek posunutí těžiště letounu směrem dozadu a s tím spojenou úsporu paliva. Nevýhodou je ovšem snížení podélné stability letounu. Proto automatizace přečerpá nebo spotřebuje palivo tak, aby před přistáním posunula těžiště letounu opět dopředu [1].



Obrázek 2.6 - Palivový systém letounu Airbus A340-500/600 [1]

Nahrazení mechanických částí elektronickými automatizovanými systémy přináší také zvýšení spolehlivosti. Pokud už k poruše dojde, bývá diagnostika problému a jeho následná oprava jednodušší díky autodiagnostickým funkcím a možnosti vyměnit vadnou součást jako blok. Celý takovýto systém tedy vede ke snížení nákladů, ať už spojených přímo s vlastním provozem letounu, tak i díky jednodušší údržbě. Další významnou úsporou nákladů může být možnost výrobce sjednotit ovládací charakteristiky letounu napříč jednotlivými typy. Aerolinie, používající



letouny podobné kategorie od jednoho výrobce, tak mohou ušetřit nemalé množství peněz na typovém výcviku a možnosti využít stejné posádky na různých typech letounů. Zvýšení přehledu o situaci díky možnosti filtrovat, zvýraznit informace, případně přímo nabídnout způsob opravy problémů nebo omezení vyplývající z poruchy také vede k celkovému zvýšení bezpečnosti provozu letounu [12].



Obrázek 2.7 - Navigační displej Boeingu 737NG. Na obrázku lze vidět zvýrazněný vysoký terén v okolí letounu. [16]

2.4 Problémy, spojené s automatizací řízení letounu

Pravděpodobně největším problémem, se kterým se můžeme při širokém používání automatizace setkat, je ztráta situačního povědomí. Při něm může automatizace vykonávat jiné věci, než posádka očekává. To může být způsobeno chybou v programování automatizace vlivem nedostatečné znalosti tohoto komplexního systému nebo také chybou systému a následné nezpozorování této chyby posádkou. U obou případů dochází k momentu překvapení v okamžiku, kdy se letoun začne chovat odlišně, než posádka očekává. Ta může na chvíli strnout ve snaze zanalyzovat situaci, protože není připravena převzít řízení a trvá jí oproti manuálnímu řízení déle, než začne řešit mnohdy banální problém [17]. Další problém je možná větší doba mezi vlastní chybou a jejím výsledným efektem. Špatně naprogramovaná část trati během dálkového letu může vyjít najevo až o několik hodin později, přičemž posádka tuto chybu zpozoruje, až se letoun stočí mimo požadovanou trať. Specifická kategorie incidentů vzniká



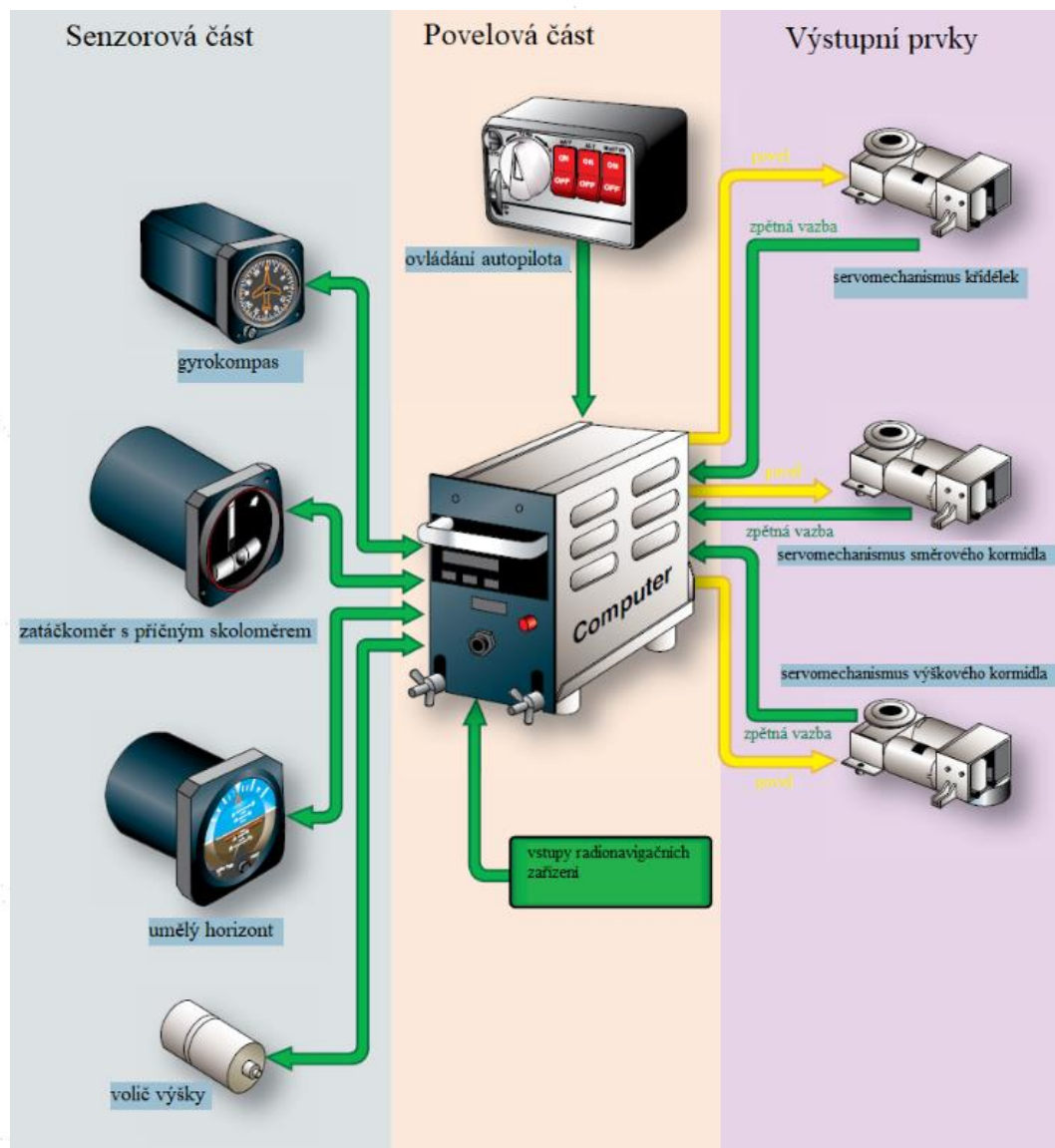
v důsledku přílišného spoléhání se na automatizaci. Při něm posádka nedostatečně kontroluje činnost automatických systémů, případně se spoléhá na případné vyřešení problému automatizací. Posádka tak nabude mylný dojem, že například letoun se systémem ochrany letové obálky nemůže letovou obálku během manuálního nebo automatického letu opustit a dostat se do pádu. Posádka tak může mít tendenci letoun provozovat v nebezpečných letových režimech, jako je například ostrá zatáčka na nízké rychlosti v malé výšce a spoléhat se, že ochranné systémy její nedůslednost napraví. Ve většině případů se tak skutečně stane. Pokud je ovšem systém v poruše nebo deaktivován, bývají následky často fatální. Opačným extrémem je pak přílišná až chronická nedůvěra v systém, která může být zapříčiněna matoucími informacemi, jako například rozpor v údajích poskytovaných přístroji na straně CPT a F/O [18].

Významným problémem je také degradace schopnosti posádky řídit letoun manuálně bez použití automatizace nebo za použití analogových přístrojů při poruše displejů. Posádka sice nalétá s letounem velké množství hodin, ovšem ve většině případů letoun řídí pouze během vzletu nebo přistání. Automatické systémy je také velmi složité a časově náročné přeprogramovat v případě předem neočekávaných změn, jako je například změna aktivní dráhy před přistáním. U letounů, které nejsou automatizací vybaveny se jedná pouze o malou změnu, kterou je schopna posádka provést za krátkou dobu. U většiny dopravních letounů je ovšem nutné kompletně přeprogramovat zadanou trať a další data, jako například data o výkonových charakteristikách letounu [18]. Dalším problémem je vlastní interakce člověk-stroj. Ta vlivem velkého množství především technických a vysoce specializovaných názvů probíhá převážně ve zkratkách a nemusí tak být na první pohled zřejmé, o jakou chybu se jedná a jaká je její závažnost [17]. Svůj významný podíl na incidentech a nehodách způsobuje i fakt, že posádka bývá často informována pouze o následcích chyb jednotlivých systémů, případně senzorů. Nebývá už ovšem informována o kvalitě informace, kterou počítač přijímá. Nemá-li systém spolehlivě nastavený autodiagnostický algoritmus, který by daná neplatná data zamítl, může dojít k přijetí těchto dat počítačem a jeho chybné reakci [18].

3 Systémy automatizace řízení letounu

3.1 Autopilot

Autopilot je zařízení, umožňující automatické držení režimu letu bez zásahů posádky. Skládá se ze senzorové části, povelové části a výstupních prvků [12].



Obrázek 3.1 - Ukázka vstupů a výstupů počítače autopilota [19]

Bez spojení s letovým povelovým přístrojem (FD) umožňuje pouze držení nastaveného ustáleného režimu – např. držení náklonu nebo horizontálního letu. Podle počtu ovládaných os je dělíme na jednoosé, dvouosé a tříosé. Jednoosý autopilot řídí letoun pouze kolem podélné osy,

tj. zajišťuje pouze klonění. Dvouosý je dále rozšířen o řízení letounu podél příčné osy, tj. zajišťuje klopení a klonění. Tříosý autopilot poté ovládá letoun podél všech tří os a je přímo napojen na všechny řídicí plochy. Součástí moderního autopilota dopravního letounu bývá i tlumič bočních kmitů (*YD*). Může se ale vyskytnout i jako samostatný systém. V poslední době *YD* proniká také do menších letounů všeobecného letectví [12].



Obrázek 3.2 - Autopilot Sperry A-3 jako zástupce prvních autopilotů [20]

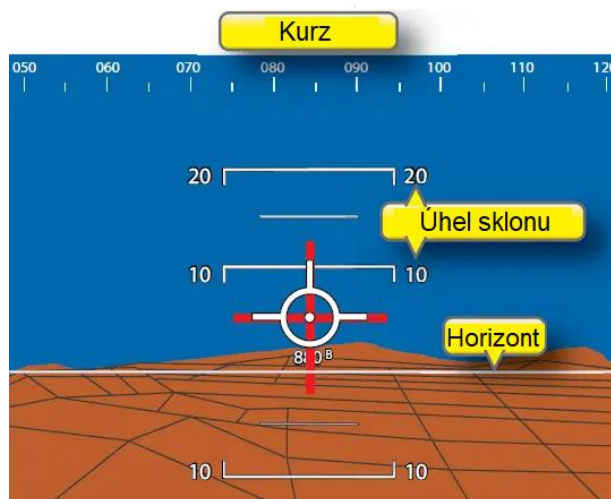


Obrázek 3.3 - Garmin GFC 500 jako příklad moderního autopilota [21]

3.2 Flight Director

Flight Director (zkr. *FD*), česky Letový povelový přístroj [22] zobrazuje na umělém horizontu, případně primárním letovém displeji (*Primary flight display*, zkr. *PFD*) směr letu, nutný pro let po nastavené trati nebo pro dosažení požadovaných parametrů, nastavených na řídicím panelu

(Flight control unit, zkr. FCU u letounů značky Airbus, Mode control panel, zkr. MCP u letounů značky Boeing). Mezi ně patří například úhel podélného a příčného sklonu pro let po naprogramované trati a další. Jelikož je optimalizován pro každý typ letounu, bývá naprogramován tak, aby jeho zásahy nedovolily překročení letové obálky. FD se používá ve dvou zobrazeních – V zobrazení a křížové zobrazení [12].



Obrázek 3.4 - Zobrazení FD na PFD – bílé letoun, červeně povel FD s křížovým zobrazením [23].
Lze také vidět syntetické zobrazení terénu před letounem

3.3 Autothrottle

Systém automatického ovládání tahu [22] neboli Autothrottle (zkr. A/T) automaticky ovládá páky plynové přípusti a nastavuje je dle aktuálního režimu letu, případně dle zvolené rychlosti. U většiny letounů jsou spolu se změnou přípusti motoru posouvány i fyzické páky v kabině, což přispívá k lepšímu situačnímu povědomí posádky. U letounů od firmy Airbus se tak ovšem neděje – páky slouží pouze jako volič módů A/T. Úzce spolupracuje s autopilotem a FD a rozšiřuje je o další funkce. U většiny letounů všeobecného letectví se ovšem nevyskytuje. Pod systém A/T se řadí také systém FADEC (*full authority digital engine control*), který v moderních letadlech ovládá a monitoruje jednotlivé parametry motoru, jako například optimalizace množství přiváděného paliva při akceleraci motoru nebo nastavení úrovně volnoběhu. Za zmínku stojí i automatická sekvence startu motoru a monitoring během ní, kdy při překročení limitních parametrů dojde k automatickému přerušení startu [12].

3.4 Flight Management System

FMS (případně *multi-function control and display unit*, zkr. *MCDU* u letounů značky Airbus) neboli *flight management system* je centrální rozhraní, které slouží ke komunikaci mezi jednotlivými automatizačními systémy a posádkou letounu [12]. Ta do systému programuje jednotlivá data, jako jsou například trať letounu, hmotnosti apod., které se používají dále k výpočtům vzletových a přistávacích rychlostí, navigačním a výkonnostním výpočtům a údajům, nutným k bezpečnému provedení letu. FMS dále monitoruje jednotlivé výkony letounu, a to včetně navigačních a výkonnostních charakteristik. Je také centrem elektronické komunikace s provozovatelem letounu a umí i vyměřovat meteorologické a provozní informace se složkami letových provozních služeb. Jedná se tedy o jakýsi centrální mozek letounu a komunikační prostředek [24].



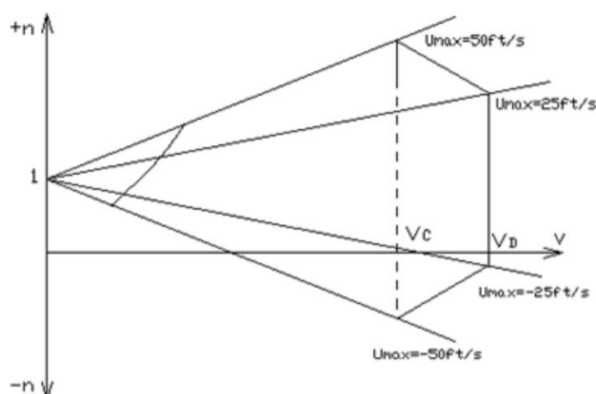
Obrázek 3.5 - MCDU prvního důstojníka letounu Airbus A320 [25]

3.5 Systém ochrany letové obálky

Systém ochrany letové obálky (*electronic stability and protection*, zkr. *ESP*) je systém, který brání překročení provozních parametrů letounu a jeho vystoupení z letové obálky. Patří sem například hlídání kladných a záporných násobků, pádové rychlosti nebo nepřekročitelné rychlosti. Systém na tuto situaci může zareagovat například omezením výchylky řídicí plochy, automatickým nastavením tahu motoru, přitažením v případě vysoké rychlosti nebo potlačením v případě nízké rychlosti. Většina moderních autopilotů a FD ve všeobecném letectví má ve své paměti letovou obálku letounu uloženou a při jejich použití tedy nemůže dojít zásahy autopilota k pádu letounu nebo k překročení jeho provozních násobků. ESP může fungovat i nezávisle na aktivaci autopilota -

3.5.2 Poryvová obálka

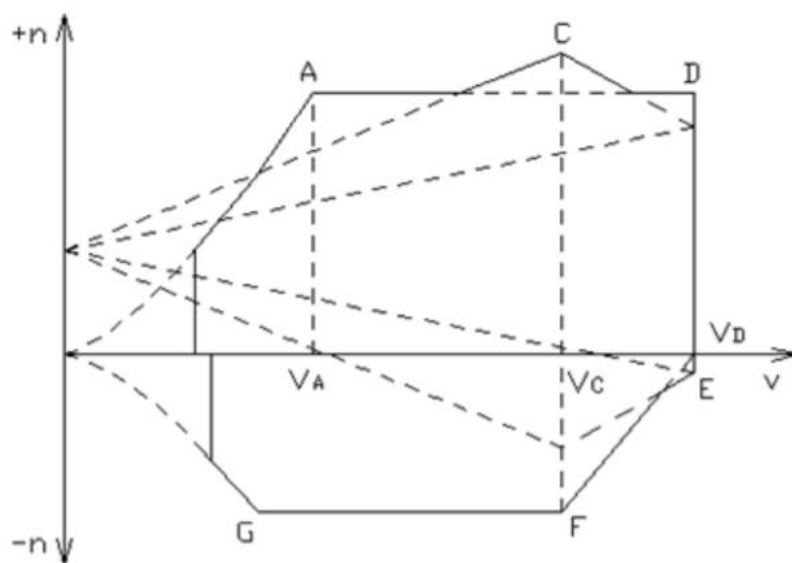
Poryvová obálka udává povolené kombinace rychlostí a násobků při letu v turbulentním prostředí. Stejně jako obratová obálka se liší dle určení letounu a je kreslena primárně pro letoun v cestovní konfiguraci. Vlivem poryvů, které se vyskytují v reálné atmosféře může dojít k překročení maximálního násobku. Jelikož se poryvová obálka liší dle intenzity daného poryvu, používá se především pro doporučení pro let v turbulenci a jiná omezení [27]. Z tvaru poryvové obálky je patrné, že pro lety rychlostí vyšší než cestovní jsou maximální násobky omezeny.



Obrázek 3.7 - Poryvová obálka [28]

3.5.3 Letová obálka

Letová obálka je kombinací obratové a poryvové obálky. Určuje, v jakém rozmezí rychlostí a násobků se pilot letounu může pohybovat, aniž by došlo k přetížení konstrukce a tím ohrožení bezpečnosti letu [27].



Obrázek 3.8 - Letová obálka [28]

4 Vybrané nové záchranné systémy v GA letounech

4.1 Garmin Emergency descent

Systém nachází své využití především v letounech s jedním pilotem, kde může být výpadek vědomí pilota z důvodu hypoxie fatální. Dojde-li k poklesu tlaku vzduchu v kabině, vyzve systém několikrát pilota, zda je při vědomí. Pokud nedojde k pilotově reakci, provede systém nouzové úkony a sklesá do nižší výšky, kde by měl pilot opět nabýt vědomí [29].



Obrázek 4.1 - Upozornění systému na nečinnost pilota [29]

4.2 Garmin Autoland

Garmin Autoland je nový systém, vyvinutý společností Garmin. Umožňuje cestujícím aktivovat systém, který automaticky vybere vhodné letiště a provede na něm přistání v případě, kdy pilot pozbude vědomí nebo není schopen ovládat letoun, například při zdravotních nesnázích. Po stisknutí tlačítka systém automaticky vyhodnotí letiště, nacházející se v okolí, jejich dráhové systémy, počasí, terén a další faktory, a vybere jedno pro přistání. Současně vyše tísňový signál. Po provedení celého manévru dojde k zastavení na RWY a vypnutí motoru. K aktivaci systému může dojít buď stisknutím tlačítka nebo automaticky. K automatické aktivaci dojde, pokud pilot nepotvrdí upozornění na neaktivitu. Systém nejprve sklesá do určité výšky, kde by mělo v případě hypoxie dojít opět k nabytí vědomí pilota. Pokud se tak nestane, dojde k aktivaci systému pro přistání. Druhou možností je zásah systému pro ochranu letové obálky. Pokud nedojde po dvou minutách k jeho deaktivaci nebo zásahu do řízení, dojde k aktivaci systému pro přistání. Systém je zatím certifikovaný pouze pro tři letouny a



nedošlo k jeho použití ve skutečné nouzi, lze ale čekat jeho postupné rozšiřování na další typy [30].



Obrázek 4.2 - Systém Garmin Autoland po aktivaci [31]

4.3 Return-to-level button

Return-to-level (LVL) button je tlačítko na autopilotech značky Garmin, aktivující tak zvaný level mode. Tento režim způsobí aktivaci autopilota, který převezme řízení letounu a z jakéhokoli režimu letu jej vyrovná do horizontálního letu [32]. Jedná se o novinku ve spojení s letouny všeobecného letectví. Vojenské letouny jsou touto funkcí vybavovány již několik desítek let.



Obrázek 4.3 - Autopilot Garmin GFC 600 s modrým tlačítkem LVL [33]



5 Vybrané letecké nehody s podílem automatizace

5.1 Ethiopian Airlines 302



Obrázek 5.1 - Boeing 737-8 MAX ET-AVJ, zničený při havárii [28]

5.1.1 Popis nehody

Vzlet letounu probíhal standardně. Krátce po vzletu došlo k aktivaci tzv. stick shakeru (*varovný systém, který při blížícím se kritickém úhlu náběhu rozvibruje sloupek řízení*) spolu s indikací pádu na PFD. Letový počítač pro zabránění pádu letoun postupně převažoval do polohy „těžký na hlavu“ pro snížení úhlu náběhu a obnovení standardního režimu letu. Posádka se těmito chybným povelům snažila zabránit nejprve elektrickým ovládáním vyvážení a poté ručním vyvažováním letounu. Kvůli vysokým silám v soustavě řízení byla ve své snaze neúspěšná [34]. Půl roku předtím došlo k fatální nehodě stroje stejného typu společnosti Lion Air. Nehoda letu ET302 tak vedla k celosvětovému uzemnění strojů tohoto typu.



Obrázek 5.2 - Kokpit letounu Boeing 737-8 MAX. Uprostřed černobílé kolo příčného vyvážení s vyklápěcí klíčkou pro ruční vyvažování [29]

5.1.2 Vliv automatizace

Dle průběžné vyšetřovací zprávy bylo pravděpodobnou příčinou nehody vyvážení letounu automatickým systémem pro ochranu před pádem, který je součástí systému MCAS. Maneuvering characteristics augmentation system je automatický řídicí systém vyvinutý firmou Boeing a Collins Aerospace určený pro letouny Boeing 737 MAX [35]. Kvůli novým, větším motorům, nacházejícím se na letounech Boeing 737 MAX došlo k jejich posunutí směrem vpřed, což má za následek změnu klopivého momentu letounu. Při letech na vysokých úhlech náběhu by tak mohlo zvýšení výkonu přivést letoun na ještě větší úhel náběhu [36]. Účelem systému MCAS je také pozměnění letových vlastností tak, aby byly blízké verzi NG. To díky společnému typovému certifikátu má za následek výrazné snížení nákladů provozovatele, spojených s výcvikem posádek [37].

Systém MCAS stejně jako kapitánův letový počítač přijímal data pouze z levého snímače úhlu náběhu, který byl v případě letu ET302 vadný. Letový počítač sice přijaté hodnoty úhlu náběhu z jednotlivých snímačů kontroloval, neporovnával je ovšem mezi sebou. K zneplatnění signálu tedy došlo pouze v případě, že se hodnota nacházela mimo měřicí rozsah. V případě letu ET302 byla naměřená hodnota 74° v měřicím rozsahu, a tudíž počítačem považována za platnou. Standardem bývá, že při zjištění rozdílných dat mezi jednotlivými snímači dojde k jejich zneplatnění spolu

Boeing 737 Max

Maneuvering Characteristics Augmentation System (MCAS)

Automaticky se aktivuje když:

- Je vysoký úhel náběhu
- Je vypnutý autopilot
- Jsou zasunuté vztlačové klapky
- Letoun točí ostrou zatáčku

MCAS tlačí před letounu pod horizont
pro zabránění pádu



THE AIR CURRENT

Deaktivuje se když:

- Je úhel náběhu dostatečně snížen
- Je potlačen piloty použitím ručního vyvážení

Obrázek 5.3 - Popis systému MCAS [41]



s chybovou hláškou. K tomu byla vyžadována příplatková výbava, kterou byla vybavena pouze pětina všech vyrobených strojů. Boeing tuto softwarovou chybu zjistil a ohlásil FAA (*Federal Aviation Administration*), nepovažoval ji ovšem za bezpečnostní riziko [34].

Posádky také nebyly o tomto systému dostatečně informovány během typového výcviku. Pro zvýšení bezpečnosti musí MCAS porovnávat jednotlivá data mezi sebou a musí dojít k omezení počtu jeho aktivací. Letové počítače stejně jako MCAS musí více porovnávat jednotlivá data, přičemž mají právo vzájemně se vetovat při nesprávných zásazích [34].

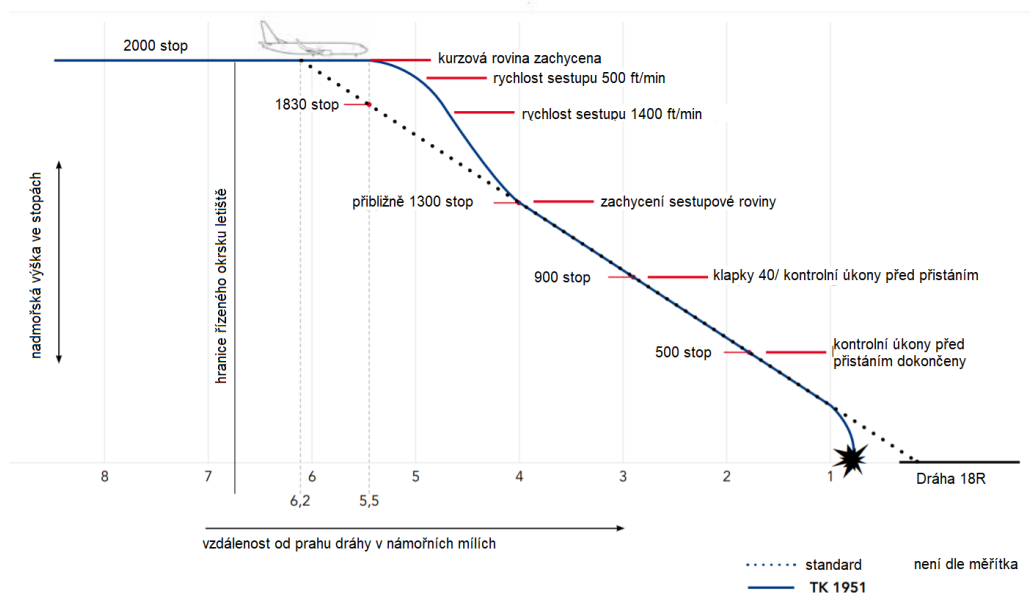
5.2 Turkish Airlines 1951



Obrázek 5.4 - Boeing 737-800 Turkish Airlines, zničený při nehodě [38]

5.2.1 Popis nehody

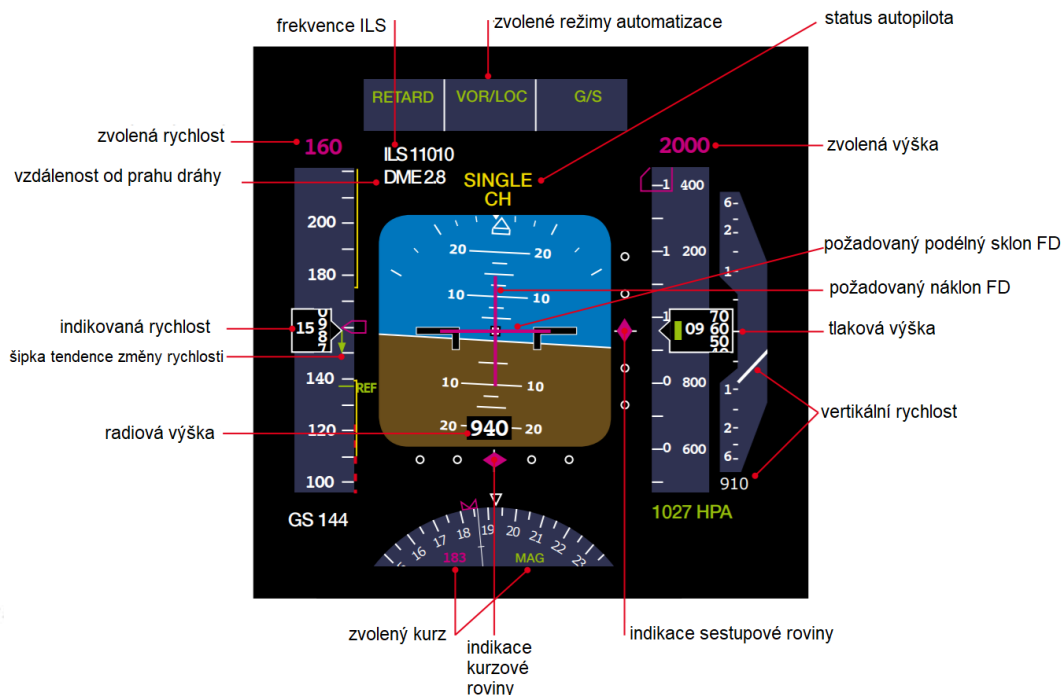
Celý let probíhal standardně až do přístrojového přiblížení na dráhu 18R v Amsterdamu. Nestabilní přiblížení spolu s doprovodnými akustickými výstrahami způsobilo výraznou pracovní zátěž posádky. Z důvodu vysoké sestupové rychlosti byl nastaven tah motorů systémem A/T na volnoběh. Při zachycení sestupové roviny autopilot snížil vertikální rychlost, A/T zůstal z důvodu vysoké dopředné rychlosti na volnoběhu. V průběhu přiblížení tak došlo k rychlému vytrácení dopředné rychlosti, jehož následkem byla aktivace výstrahy před pádem v závěrečné fázi přiblížení, na který posádka již nestihla včas reagovat [39].



Obrázek 5.5 - Schéma sestupu letu Turkish 1951 s vyznačenou rovinou sestupu [40].

5.2.2 Vliv automatizace

Dle závěrečné zprávy byl příčinou nehody přechod do pádu na malé rychlosti způsobený aktivací módu „retard flare“ (*snížení tahu motorů na volnoběh těsně před dotykem s dráhou během přistání*), který posádka nerozpoznala včas, k čemuž významně přispěla zvýšená pracovní zátěž posádky v důsledku chybně provedeného vstupu do sestupové roviny. Počáteční neodpojení A/T, které na manuální přesun pák připustil na plný výkon, reagovalo jejich opětovným snížením na volnoběh, navíc vedlo k dalšímu prohloubení pádu [39].



Obrázek 5.6 - Snímek PFD letu Turkish 1951 s vyznačenými daty [41]

Aktivaci režimu „retard flare“ způsobila porucha radiového výškoměru, ze kterého autopilot přebíral data bez porovnání s druhým radiovým výškoměrem. Letecké společnosti a výrobce Boeing o této chybě věděli, její vliv na bezpečnost se ovšem lišil díky různým verzím použitých radiových výškoměrů a softwaru letových počítačů. Nestabilní přiblížení pak díky zvýšené pracovní zátěži způsobilo ztrátu situačního povědomí posádky, která nezpozorovala aktivaci nesprávného režimu automatizace. Pro udržení situačního povědomí se obecně doporučuje, aby si piloti navzájem nahlas hlásili jakoukoliv zpozorovanou změnu režimu automatizace.



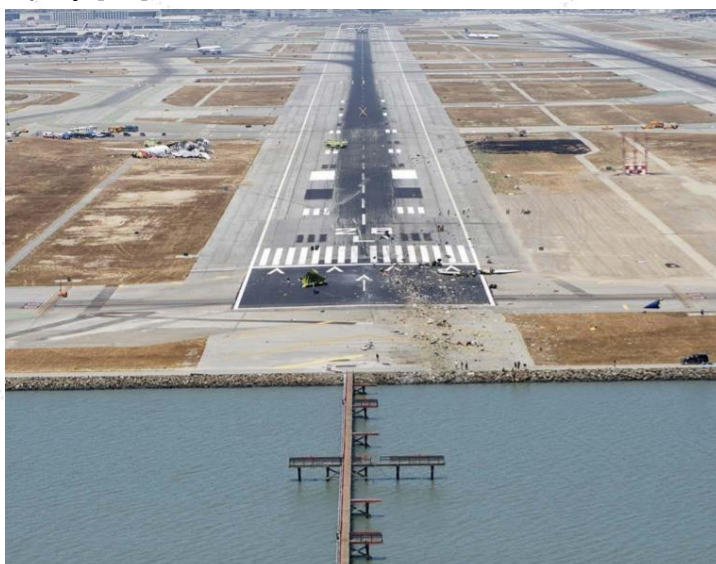
5.3 Asiana Airlines 214



Obrázek 5.7- Boeing 777-200 společnosti Asiana Airlines, zničený při nehodě v San Franciscu [42]

5.3.1 Popis nehody

Během závěrečné fáze přiblížení došlo k přechodu letounu do pádu a jeho roztržení o hráz na prahu dráhy 28R. Posádka během závěrečné fáze letu řídila letoun manuálně kvůli vypnutému systému ILS z důvodu údržby. Letoun byl až do nárazu bez jakýchkoliv technických poruch, které by k nehodě přispěly [43].



Obrázek 5.8 - Letecký pohled na místo nehody [44]



5.3.2 Vliv automatizace

Příčina nehody je velmi podobná jako v předchozím případě – přechod do pádu na malé rychlosti v malé výšce. Díky tomu se letoun dostal pod sestupovou rovinu a narazil do hráze, ohraničující dráhový systém letiště v San Franciscu. K pádu letounu došlo díky špatnému ovládání letové automatizace posádkou, při které pilot neúmyslně deaktivoval režim automatické regulace rychlosti (*SPEED*) na A/T. To spolu se ztrátou situačního povědomí vlivem zvýšené pracovní zátěže posádky při manuální pilotáži vedlo k přechodu do pádu. Významným spoluviníkem nehody byla dále komplexnost systému automatické regulace tahu motorů. Ten bez vědomí posádky přešel do režimu „hold,“ ve kterém dojde k deaktivaci regulace rychlosti, ale ne k deaktivaci celého systému, které by bylo doprovázeno akustickou a vizuální výstrahou. Během tohoto režimu udržuje A/T zvolený tah motorů, čili chová se stejně, jako kdyby byl systém A/T deaktivován. Pilot se také spoléhal na systém ochrany letové obálky. Ten se ale automaticky deaktivuje před přistáním ve výšce 100 ft [43].

Pilot tak z typového výcviku a popisu systémů nabyl dojmu, že automatická ochrana letové obálky se aktivuje vždy a letoun tak fakticky nemůže přejít do pádu. Díky zvýšené pracovní zátěži, způsobené nízkým náletem na daném typu a nutností provést vizuální přiblížení, tak ztratil přehled o aktivovaných režimech automatizace. [43]

5.4 Air France 447



Obrázek 5.9 - Letoun Airbus A330-200 společnosti Air France zničený při nehodě [45]

5.4.1 Popis nehody

Během letu nad Atlantským oceánem prolétal letoun oblastí s výskytem bouřek. Krátce po vlétnutí do této oblasti došlo ke ztrátě indikace rychlosti.



To způsobilo automatickou deaktivaci autopilota a A/T spolu se snížením úrovně FBW (*alternate law 2*). Díky tomuto se změnily výchylky nutné pro řízení letounu. Ve snaze udržet letoun v letové obálce nastavila posádka maximální výkon a začala stoupat. Vlivem přílišného úhlu sklonu došlo k přechodu do pádu, který dále umocnilo plně přitažené řízení a s tím spojené automatické převažování letounu ve snaze ještě více zvýšit úhel sklonu. Indikace pádu fungovala normálně, byla ovšem ovlivněna ztrátou indikace rychlosti [46]. Posádka v závěrečných okamžicích pádu správně poznala, vlivem logiky fly-by-wire se ale vzájemné opravné zásahy jednotlivých pilotů vyrušily. I pokud by byly zásahy posádky provedeny, nebylo by možné letoun z této výšky z tak rozvinutého pádu zachránit.

5.4.2 Vliv automatizace

Příčinou nehody byl přechod letounu do pádu, ke kterému došlo vlivem ztráty indikace rychlosti a nesprávnými zásahy posádky do řízení. Svůj velký vliv na nehodu měla i automatizace a rozhraní člověk-stroj. Při vlétnutí do bouřkové oblačnosti došlo k zamrznutí pitot-statických snímačů, což vedlo ke ztrátě indikace rychlosti. Letové počítače postupně vyhodnotily všechna měření jako chybná a způsobily deaktivaci autopilota a A/T spolu s degradací řízení fly-by-wire a četnými chybovými hláškami. Režim *alternate law 2* fly-by-wire se vyznačuje tím, že potřebné výchylky pro klonění letounu jsou podstatně menší než ve standardním režimu díky vyšší účinnosti kormidel během vyšších rychlostí. Ve standardním režimu je výchylka kormidla přímo úměrná požadované úhlové rychlosti, v degradovaném režimu řízení je ale přímo úměrná výchylce side sticku. Klonění letounu se tak díky vysoké rychlosti stalo podstatně citlivějším. Rychlost klopení letounu se ale nemění, což může komplikovat řízení letounu a dále zvyšovat pracovní zátěž posádky. [46].

Automatizace upozorňovala posádku na stále nové chyby, které ovšem byly pouze důsledkem ztráty měření rychlosti. Dále vytvářela iluzi, že letounu hrozí překročení maximální povolené rychlosti a že je nutné dále stoupat. Bez možnosti vizuálního ověření podélného sklonu během nočního letu a zahlcení chybovými hláškami si posádka vytvořila mylnou představu o probíhající situaci a považovala většinu indikovaných dat za nedůvěryhodnou [46].

Zmatení posádky také přispěla skutečnost, že jak pád, tak i překročení maximální rychlosti je doprovázeno vibrací řídicích ploch. Závěrečná zpráva také upozorňuje na nedostatečné cvičení vybírání pádů u dopravních pilotů. Pokud pilot aktivně nelétá na strojích všeobecného letectví, nemá možnost se s pády pravidelně setkávat a cvičit jejich vybírání [46].



5.5 Air Transat 236



Obrázek 5.10 - Letoun A330-200 společnosti Air Transat ze zmíněného incidentu [47]

5.5.1 Popis incidentu

Během transatlantického letu došlo vlivem nerozpoznaného úniku paliva k vysazení obou motorů. Posádka provedla nouzové přistání na letišti v Lajes na Azorských ostrovech. Na rozdíl od předchozích nehod si tato nevyžádala oběti na životech a letoun je v době psaní této práce stále v provozu [48].

5.5.2 Vliv automatizace

Příčinou incidentu bylo vysazení motoru kvůli nedostatku paliva, způsobené únikem. Únik paliva byl způsoben neoriginálními díly, které vedly k prodření palivových hadic a nestandardním chybovým hlášením – nízkému množství, nízké teplotě a vysokému tlaku oleje. Tato hlášení jsou velmi nestandardní – nízké množství oleje by mělo být doprovázeno i jeho nízkým tlakem. Při letu v cestovní hladině pak může dojít spíše k vysoké teplotě oleje vlivem vysokého nastaveného výkonu pohonné jednotky. Během snahy o vyřešení těchto problémů došlo k protržení palivové hadice a masivnímu úniku paliva. Tento únik byl ale automaticky vyvažován přečerpáním paliva mezi nádržemi. Až po delší době posádka zpozorovala rozdílný stav paliva v jednotlivých křídelních nádržích, vedoucí v jeho nevyváženému rozložení. Únik se nepodařilo vizuálně potvrdit. Vlivem nedůvěry v indikace, způsobené předchozími chybovými hláškami, posádka otevřela přečerpávací ventil, který měl za cíl vyrovnat stav mezi jednotlivými nádržemi. Ten ovšem nesmí být otevřen při úniku paliva. Po upozornění posádka odhalila nízký stav paliva a rozhodla se pro přistání na letišti v Lajes na Azorských ostrovech. Krátce po změně trati došlo



postupně k vysazení obou motorů vlivem nedostatku paliva. I přes tyto obtíže posádka zvládla s letounem bezpečně přistát na dráze letiště v Lajes [49].



Obrázek 5.11 - ECAM (Electronic Centralized Aircraft Monitor) signalizující přečerpávání paliva z ocasní nádrže [49]



Závěr

Tato bakalářská práce se zabývala systémy automatizace v civilních dopravních letounech a letounech všeobecného letectví, jejich historickým vývojem, specifikacemi, jejich spoluprací s člověkem a nehodami, které způsobily nebo se na nich podílely.

Automatizační systémy jsou dnes již standardní komplexní systémy, vyskytující se ve všech oblastech letectví. Pro jejich správné a efektivní využití je ovšem nutná jejich perfektní znalost, a především správné pochopení filozofie jejich ovládání. V dnešní době převažuje trend co nejčastějšího používání automatizace během prakticky celého letu. To má za následek výrazné zvýšení bezpečnosti a komfortu celého letu, včetně možnosti snížení meteorologických minim na přistání. Rozvoj automatizačních technologií s sebou ale do letectví vnáší nová rizika a fenomény, ať už spojená přímo s používáním automatizace nebo z dlouhodobého hlediska. Jeden z nejvýraznějších a nejzávažnějších dlouhodobých fenoménů je uvažování pilotních schopností posádky. Čím dál více pozornosti se také upírá na správné navržení jednotlivých prvků, především pak ergonomie jejich používání a celková komunikace na rozhraní člověk-stroj. Tato specifika se také díky stále se zvyšujícímu rozšíření automatizace v letounech všeobecného letectví stávají důležitější nežli dříve. I přes tyto skutečnosti ovšem jejich výhody a celkové zvýšení bezpečnosti provozu výrazně převyšuje nevýhody, spojené s jejich používáním.



Použitá literatura

- [1] MOIR, I. a A. SEABRIDGE. *Aircraft Systems: mechanical, electrical, and avionics subsystems integration*. 3rd ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2008. ISBN 978-0-470-05996-8.
- [2] J. P., Sutherland. *Fly-by-wire: Flight control systems*. 1968. Dostupné také z: <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/679158.pdf>
- [3] Flight operational commonality: Celebrating 25 years. *Airbus technical magazine*. Airbus, 2016, **2016**(58), 4-11. ISSN 1293-5676.
- [4] HAMEL, Peter G., ed., Ravindra V. JATEGAONKAR. *In-Flight Simulators and Fly-by-Wire/Light Demonstrators: : A Historical Account of International Aeronautical Research*. Springer, 2017.
- [5] The twin-engine, wide-body Airbus A350 XWB at Spain's Adolfo Suárez Madrid-Barajas airport. In: *The European space agency* [online]. [cit. 2021-05-02]. Dostupné z: http://www.esa.int/Space_in_Member_States/Czech_Republic/Novy_letoun_Airbus_A350_je_kompatibilni_se_systemem_EGNOS
- [6] Fly-By-Wire. *Skybrary* [online]. [cit. 2021-03-05]. Dostupné z: <https://www.skybrary.aero/index.php/Fly-By-Wire>
- [7] RAMSEY, James W. Power-By-Wire. *Aviation Today* [online]. [cit. 2021-05-03]. Dostupné z: <https://www.aviationtoday.com/2001/05/01/power-by-wire/>
- [8] GEORGE THE AUTOPILOT. *Historic Wings* [online]. 2012 [cit. 2021-02-23]. Dostupné z: <http://fly.historicwings.com/2012/08/george-the-autopilot/>
- [9] *Popular Science*. New York: Time4 Media, 1930, . ISSN 0161-7370.
- [10] British Airways Trident3B landing at London Heathrow Airport. In: *Wikimedia Commons* [online]. [cit. 2021-05-02]. Dostupné z: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:British_Airways_Trident3B_\(7107744185\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:British_Airways_Trident3B_(7107744185).jpg)
- [11] *Radio navigation: ATPL Ground training series*. Oxford: CAE Oxford, 2014.
- [12] *Instrumentation*. ATPL Ground Training Series. Oxford: CAE Oxford Aviation Academy, 2014. ISBN není k dispozici.
- [13] What is LDG INHIBIT?. In: *FTTW: Flight training taiwan* [online]. [cit. 2021-05-02]. Dostupné z: <https://www.fttw.com.tw/news/html/?76.html>



- [14] STEMBER, Felix. Flight engineer station of Boeing 747-200 (PH-BUK) "Louis Bleriot" at Aviodrome Lelystad. In: *Wikimedia Commons* [online]. 2008 [cit. 2021-05-02]. Dostupné z: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Flight_engineer_station_of_Boeing_747-200_\(PH-BUK\)_at_Aviodrome_Lelystad.JPG](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Flight_engineer_station_of_Boeing_747-200_(PH-BUK)_at_Aviodrome_Lelystad.JPG)
- [15] GOUSSÉ, H. Airbus begins deliveries of first A350 XWBs with touchscreen cockpit displays option to customers. In: *Airbus S.A.S.* [online]. [cit. 2021-05-02]. Dostupné z: <https://www.airbus.com/newsroom/press-releases/en/2019/12/airbus-begins-deliveries-of-first-a350s-with-touchscreen-cockpit-displays-option-to-customers.html>
- [16] The Vertical Situation Display (VSD) showing the vertical terrain profile of El Teide volcano in Tenerife. In: *Reddit* [online]. [cit. 2021-05-02]. Dostupné z: https://www.reddit.com/r/airplanes/comments/edhvy1/the_vertical_situation_display_vsd_showing_the/
- [17] MARTINUSSEN, Monica a David HUNTER. *Aviation psychology and human factors*. Second edition. Boca Raton: CRC Press, 2018. ISBN 978-1-4987-5752-2.
- [18] *Human performance and limitations: ATPL Ground training series*. Oxford: CAE Oxford, 2014.
- [19] Typical analog autopilot system components. In: *Flight mechanic* [online]. [cit. 2021-03-03]. Dostupné z: <https://www.flight-mechanic.com/wp-content/uploads/2017/11/10-108.jpg>
- [20] *Autopilot, Gyro Turn And Horizon, Sperry, A-3, Cutaway* [online]. In: . [cit. 2021-03-05].
- [21] *Garmin GFC-500* [online]. In: . [cit. 2021-03-03]. Dostupné z: <https://www.flyer.co.uk/gfc-500-digital-autopilot/>
- [22] ŘÁDA, Ivan. *Anglicko-český letecký slovník: English-Czech aviation dictionary*. Vyd. 1. Praha: Leda, 2001. ISBN 80-85927-92-6.
- [23] *Advanced Avionics Handbook*. Washington D.C.: Federal Aviation Administration, 2009.
- [24] Flight Management System. *Skybrary* [online]. [cit. 2021-04-19]. Dostupné z: https://www.skybrary.aero/index.php/Flight_Management_System
- [25] PAULUS, Christopher. CP MCDU. In: *Wikimedia Commons* [online]. 2009 [cit. 2021-03-03]. Dostupné z: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:CP_MCDU.jpg



- [26] Flight Control Laws. *Skybrary* [online]. [cit. 2021-03-05]. Dostupné z: https://www.skybrary.aero/index.php/Flight_Control_Laws
- [27] *Učebnice pilota 2016: pro žáky a piloty všech druhů letounů a sportovních létajících zařízení, provozujících létání jako svou zájmovou činnost*. Cheb: Svět křídel, 2016. ISBN 978-80-87567-89-0.
- [28] JEŘÁBEK, Ivan. *Základy letadlové techniky* [online]. In: . [cit. 2021-05-02]. Dostupné z: http://webdav.agents.fel.cvut.cz/data/teaching/bep/BEP4_2014.pdf
- [29] *Garmin Autonomi* [online]. [cit. 2021-03-03]. Dostupné z: <https://discover.garmin.com/en-US/autonomi/#edm>
- [30] ČORŇÁK, Lubomír. Piper M600/SLS. *Flying revue* [online]. 2020, **13**(5), 10-18 [cit. 2021-02-23]. ISSN 1802-9027. Dostupné z: <https://www.pablikado.cz/dokument/AjB7xkmeAd3RfDAv>
- [31] GARMIN AUTOLAND ACHIEVES EASA AND FAA CERTIFICATION ON DAHER TBM 940. In: *Ultimate jet* [online]. 2020 [cit. 2021-03-03]. Dostupné z: <https://ultimatejet.com/garmin-autoland-achieves-easa-and-faa-certification-on-daher-tbm-940/>
- [32] *Blue Button: Helping to Keep the Blue Side Up* [online]. 2018 [cit. 2021-03-03]. Dostupné z: <https://www.garmin.com/en-US/blog/aviation/blue-button-helping-keep-blue-side/>
- [33] GFC™ 600 Digital Autopilot. In: *Garmin* [online]. [cit. 2021-03-03]. Dostupné z: <https://buy.garmin.com/en-US/US/p/604258>
- [34] Crash: Ethiopian B38M near Bishoftu on Mar 10th 2019, impacted terrain after departure. *The Aviation Herald* [online]. [cit. 2021-04-08]. Dostupné z: <http://avherald.com/h?article=4c534c4a/0094&opt=0>
- [35] *Boeing's 737 Max design contains fingerprints of hundreds of suppliers* [online]. 2019 [cit. 2021-03-05]. Dostupné z: https://www.washingtonpost.com/business/economy/boeings-737-max-design-contains-fingerprints-of-hundreds-of-suppliers/2019/04/05/44f22024-57ab-11e9-8ef3-fbd41a2ce4d5_story.html
- [36] Maneuvering Characteristics Augmentation System (MCAS). *Skybrary.aero* [online]. [cit. 2021-03-05]. Dostupné z: [https://www.skybrary.aero/index.php/Maneuvering_Characteristics_Augmentation_System_\(MCAS\)](https://www.skybrary.aero/index.php/Maneuvering_Characteristics_Augmentation_System_(MCAS))
- [37] *Transport Canada Civil Aviation (TCCA) Operational Evaluation Report* [online]. [cit. 2021-03-05]. Dostupné z: <https://tc.canada.ca/en/aviation/commercial-air-services/operational->



- evaluation-reports/transport-canada-civil-aviation-tcca-operational-evaluation-report
- [38] TC-JGE Turkish Airlines Boeing 737-8F2(WL). In: *Planespotters.net* [online]. [cit. 2021-04-08]. Dostupné z: <https://www.planespotters.net/photo/067149/tc-jge-turkish-airlines-boeing-737-8f2wl>
- [39] *Crashed during approach, Boeing 737-800, near Amsterdam Schiphol Airport* [online]. 2010 [cit. 2021-04-08]. Dostupné z: <https://www.onderzoeksraad.nl/en/page/1182/turkish-airlines-crashed-during-approach-boeing-737-800-amsterdam>
- [40] Schéma sestupu letu Turkish 1951 s vyznačenou rovinou sestupu. *Crashed during approach, Boeing 737-800, near Amsterdam Schiphol Airport* [online]. 2010, s. 62 [cit. 2021-04-08]. Dostupné z: https://catsr.vse.gmu.edu/SYST460/TA1951_AccidentReport.pdf
- [41] Snímek PFD letu Turkish 1951 s vyznačenými daty. *Crashed during approach, Boeing 737-800, near Amsterdam Schiphol Airport* [online]. 2010, s. 22 [cit. 2021-04-08]. Dostupné z: https://catsr.vse.gmu.edu/SYST460/TA1951_AccidentReport.pdf
- [42] ICARUS, Aero. Asiana Airlines Boeing 777-200ER (HL7742) landing at Hong Kong International Airport. In: *Wikimedia Commons* [online]. [cit. 2021-04-08]. Dostupné z: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Asiana_Airlines_Boeing_777-200ER;_HL7742@HKG;31.07.2011_614fy_\(6053139064\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Asiana_Airlines_Boeing_777-200ER;_HL7742@HKG;31.07.2011_614fy_(6053139064).jpg)
- [43] *Descent Below Visual Glidepath and Impact With Seawall: Accident Report* [online]. 2013 [cit. 2021-04-08]. Dostupné z: <https://www.nts.gov/investigations/AccidentReports/Reports/AAR1401.pdf>
- [44] Letecký pohled na místo nehody. *Descent Below Visual Glidepath and Impact With Seawall: Accident report* [online]. 2013, s. 13 [cit. 2021-04-08]. Dostupné z: <https://www.nts.gov/investigations/AccidentReports/Reports/AAR1401.pdf>
- [45] KIERZKOWSKI, Pawel. Air France A330-203 F-GZCP lands at Paris-Charles de Gaulle Airport. In: *Wikimedia Commons* [online]. [cit. 2021-04-19]. Dostupné z: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:PKIERZKOWSKI_070328_FGZCP_CDG.jpg
- [46] *Final report on the accident on 1st June 2009 to the Airbus A330-203 registered F-GZCP operated by Air France flight AF 447 Rio de*



- Janeiro - Paris* [online]. 2012 [cit. 2021-04-08]. Dostupné z: <https://www.bea.aero/docspa/2009/f-cp090601.en/pdf/f-cp090601.en.pdf>
- [47] ROBIN, Mael. Airbus A330-243 reg. C-GITS at Nantes. In: *Jetphotos* [online]. [cit. 2021-05-02]. Dostupné z: <https://www.jetphotos.com/photo/8972425>
- [48] Aviation Archives; Air Transat Flight 236 made glide record in distress. In: *Aviation geeks* [online]. 2020 [cit. 2021-05-02]. Dostupné z: <https://aviationgeeks1.com/aviation-archives-air-transat-flight-236-made-glide-record-in-distress/>
- [49] *All Engines-out Landing Due to Fuel Exhaustion, Air Transat, Airbus A330-243 marks C-GITS, Lajes, Azores, Portugal, 24 August 2001* [online]. , 104 [cit. 2021-05-11]. Dostupné z: <https://www.air-accidents.com/event/others/134240801.pdf>



Seznam obrázků

Obrázek 1.1 - Mechanické ovládání výškového kormidla [2]	17
Obrázek 1.2 - Mechanismus spoilerů, ovládající příčné řízení letounu Boeing 737 [1]	18
Obrázek 1.3 - Airbus A350-900, vybavený systémem fly-by-wire [5].....	18
Obrázek 1.4 - Vysunutá mechanizace křídla po přistání – flaperon i křídélka vychýlena směrem nahoru, kde slouží podobně jako spoilers k rušení vztlaču a zvýšení odporu [6]	19
Obrázek 1.5 - Stejný typ letounu před přistáním – flaperon sklopen dolů a křídélka v horizontu [7].....	19
Obrázek 1.6 - Lockheed Martin F-35A Lightning II vybavený systémem power-by-wire [8]	20
Obrázek 2.1 - Letoun Hawker Siddeley HS-121 Trident 3B britské společnosti British Airways (nástupce BEA). Jednalo se o první civilní letoun, certifikovaný pro plně automatické přistání [10]	21
Obrázek 2.2 - Schéma fungování systému ILS [13]	22
Obrázek 2.3 - Hláška LDG INHIBIT upozorňuje posádku na aktivace filtrace chybových hlášek během přistání. Systém chybovou hlášku zobrazí až po přistání letounu, kdy je pracovní zátěž posádky výrazně nižší [13]	23
Obrázek 2.4 - Stanoviště letového inženýra Boeing 747-200. V moderních letounech je tato pozice eliminována a nahrazena automatickými systémy [14]	24
Obrázek 2.5 - Moderní kokpit letounu Airbus A350-900XWB [15]	24
Obrázek 2.6 - Palivový systém letounu Airbus A340-500/600 [1]	25
Obrázek 2.7 - Navigační displej Boeingu 737NG. Na obrázku lze vidět zvýrazněný vysoký terén v okolí letounu. [16]	26
Obrázek 3.1 - Ukázka vstupů a výstupů počítače autopilota [19]	28
Obrázek 3.2 - Autopilot Sperry A-3 jako zástupce prvních autopilotů [20] 29	
Obrázek 3.3 - Garmin GFC 500 jako příklad moderního autopilota [21] ...	29
Obrázek 3.4 - Zobrazení FD na PFD – bíle letoun, červeně povel FD s křížovým zobrazením [23]. Lze také vidět syntetické zobrazení terénu před letounem.....	30
Obrázek 3.5 - MCDU prvního důstojníka letounu Airbus A320 [25].....	31
Obrázek 3.6 - Obratová obálka pro let s vysunutými i zasunutými klapkami [28]	32
Obrázek 3.7 - Poryvová obálka [28]	33
Obrázek 3.8 - Letová obálka [28].....	34
Obrázek 4.1 - Upozornění systému na nečinnost pilota [29]	35
Obrázek 4.2 - Systém Garmin Autoland po aktivaci [31]	36
Obrázek 4.3 - Autopilot Garmin GFC 600 s modrým tlačítkem LVL [33] ..	36
Obrázek 5.1 - Boeing 737-8 MAX ET-AVJ, zničený při havárii [28]	37



Obrázek 5.2 - Kokpit letounu Boeing 737-8 MAX. Uprostřed černobílé kolo příčného vyvážení s vyklápěcí klíčkou pro ruční vyvažování [29]	37
Obrázek 5.3 - Popis systému MCAS [41]	38
Obrázek 5.4 - Boeing 737-800 Turkish Airlines, zničený při nehodě [38]	39
Obrázek 5.5 - Schéma sestupu letu Turkish 1951 s vyznačenou rovinou sestupu [40]	40
Obrázek 5.6 - Snímek PFD letu Turkish 1951 s vyznačenými daty [41] ...	41
Obrázek 5.7- Boeing 777-200 společnosti Asiana Airlines, zničený při nehodě v San Franciscu [42]	42
Obrázek 5.8 - Letecký pohled na místo nehody [44]	42
Obrázek 5.9 - Letoun Airbus A330-200 společnosti Air France zničený při nehodě [45]	43
Obrázek 5.10 - Letoun A330-200 společnosti Air Transat ze zmíněného incidentu [47]	45
Obrázek 5.11 - ECAM (Electronic Centralized Aircraft Monitor) signalizující přečerpávání paliva z ocasní nádrže [49]	46